

Las especificaciones de resistencias mínimas pueden ser prácticas

WILLIAM A. CORDON

Journal of the American Concrete Institute, julio 1969, págs. 539-44

La industria del hormigón se enfrenta con el problema ocasional de controversias acerca de la idoneidad del hormigón en las estructuras. Esto normalmente se debe a una idea equivocada, pero tiende a crear una sombra de duda sobre la seguridad del hormigón como material de construcción estructural.

Muchas profesiones, empresas privadas y oficios están involucrados en el proyecto, fabricación y uso del hormigón y derivados del mismo. Es difícil, por tanto, establecer la responsabilidad específica y llegar a un consenso acerca de la suficiencia de una estructura cuando los resultados de los ensayos son dudosos.

El ensayo de resistencia a la compresión es el medio más común de estimar la calidad del hormigón empleado en las obras. El fin de este trabajo es discutir las prácticas corrientes en el uso del ensayo de resistencia a la compresión y presentar alternativas que reducirán a un mínimo las dudas y las controversias sobre la calidad del hormigón.

LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

Tradicionalmente, la resistencia del hormigón de una estructura se valora por la resistencia a la compresión de cilindros de ensayo de 15×30 cm fabricados de muestras del hormigón empleado en la confección de la estructura. La calidad del hormigón en una estructura se considera a veces inferior si la resistencia de cualquier probeta cae por debajo de los límites mínimos especificados.

La suposición de que la resistencia del hormigón en una estructura puede medirse por la resistencia de unos cilindros de ensayo, se mantiene más por tradición que por verdad. Hay numerosas variables que influyen en la resistencia de los cilindros de hormigón que pueden ser aplicables o no al hormigón en una estructura (1). Por otra parte, una mezcla de hormigón de alta calidad es de esperar que produzca un hormigón de elevada calidad en una estructura y elevadas resistencias en los cilindros de 15×30 cm.

El ensayo de resistencia es superior en muchos aspectos a otros métodos, puesto que refleja la influencia de las variables de producción y construcción y los cambios ambientales. No hay ningún otro ensayo, corrientemente en uso, que sea superior al ensayo de resistencia para el control de la calidad del hormigón. Sin embargo, la utilidad del ensayo de resistencia debe ser cuidadosamente valorada y las especificaciones deben basarse en interpretaciones realistas de los resultados de los ensayos. Bloem (2), reconoce este problema como sigue:

“Aunque la validez del ensayo de resistencia normalizado, como base principal para aceptar el hormigón puede ser discutible, el fabricante debe de reconocer que es poco probable que este criterio sea sustituido por controles más realísticos en un futuro previsible. Debe, por lo tanto, armarse con el conocimiento del significado de las medidas de resistencia y tomar medidas para evitar ser víctima de sus caprichos”.

La suposición de que el ensayo de resistencia puede emplearse sin calificación, como una medida de aceptación o de rechazo de una estructura de hormigón, tiene serias limitaciones. Para transigir con este problema, algunas exigencias de especificación no proporcionan las variaciones normales en la resistencia de los cilindros de hormigón.

PROBABILIDAD ESTADISTICA DE ENSAYOS CON RESULTADOS BAJOS

En 1957, el Comité ACI 214 (3) recomendó los métodos estadísticos para valorar los ensayos de resistencia del hormigón. La posición del Comité 214 en aquel momento era que, por causa de variaciones normales, la industria debe aceptar ensayos de resistencia baja. Una media de un ensayo bajo de cada 10, se sugería como aceptable. En 1963, el Código de la Construcción ACI permite una media de un ensayo bajo de cada 10 para estructuras proyectadas por los métodos de resistencia a rotura y dos ensayos bajos de cada 10 para estructuras proyectadas por los métodos de resistencia de trabajo.

La experiencia indica que algunos ingenieros y arquitectos no están dispuestos a aceptar la suposición original de la inevitabilidad de ensayos de resistencia bajos. Puede argumentarse, que la filosofía del Comité 214 tiende a degradar el hormigón a un estado indigno de confianza. Muchos ingenieros y arquitectos prefieren que f'_c sea la “resistencia mínima” tolerable en cualquier ensayo.

USO INDEBIDO DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL HORMIGON

No es raro que un ensayo de resistencia bajo y único sea causa de controversias entre el proveedor, el contratista, el ingeniero de estructuras y el propietario. El propietario se coloca en la posición nada envidiable de aceptar una estructura que él opina que es de calidad fuera de norma y en la alternativa, aún más indeseable, de perjudicar posiblemente la estructura por eliminación y sustitución del hormigón dudoso. La posición del proveedor es insostenible, porque se le exige producir un hormigón que teóricamente es imposible de fabricar.

Muchos ingenieros de estructuras tratan de sobreponerse a este problema requiriendo el uso de cantidades adicionales de cemento en la mezcla de hormigón sobre y por encima del normalmente requerido para conseguir las resistencias deseadas. Es difícil argumentar con la posición de que el costo del cemento adicional es pequeño si se compara con los problemas que surgen cuando se encuentran ensayos de resistencia baja y cuando no se ha acordado ninguna provisión para tales ensayos. Desgraciadamente, la cantidad de cemento empleada se ha conseguido por tradición y por hábito; no por métodos de ingeniería.

Adiciones al azar de cemento extra a la mezcla de hormigón no proporciona métodos controlados para reducir la probabilidad de hormigón con baja resistencia. Cuando se añade suficiente cemento para estar seguro de que se obtiene una resistencia adecuada a pesar de las malas prácticas de construcción, todo lo relacionado con la obra en sí se relaja y se promueve realmente la práctica de la mala construcción.

Los ingenieros, arquitectos y propietarios deben tener completa confianza en el uso del hormigón estructural. La suficiencia de la calidad del hormigón en estructuras no debe ser una cuestión de control preciso en obra, medida por la resistencia de cilindros de 15×30 cm. Un uso más realista del ensayo de resistencia es controlar las proporciones de mezcla y la uniformidad en la construcción a un nivel tal que asegure la suficiencia estructural independientemente de las variaciones.

RESISTENCIA MINIMA Y PROBABILIDAD NORMAL

Aunque teóricamente es imposible físicamente eliminar todos los ensayos bajos, sí es posible reducir la probabilidad de tales ensayos a cualquier nivel deseable.

La curva de probabilidad normal es simétrica y alcanza el cero en cada lado, a medida que aumenta la desviación del valor medio \bar{x} . Se considera que una desviación de 3σ del valor medio, incluye todas las variaciones normales. Por definición, la resistencia mínima es igual a $(\bar{x} - 3\sigma)$. Teóricamente habrá una media de sólo 1,3 ensayos de cada 1.000 que caigan por debajo de $(\bar{x} - 3\sigma)$.

La tabla 1 es una adaptación de la integral de probabilidad normal y muestra la probabilidad de que un ensayo caiga por debajo de algún valor de σ desde la media \bar{x} . Por ejemplo, si \bar{x} —la resistencia media— está 1σ por encima de f'_c , la probabilidad de que un ensayo caiga por debajo de f'_c es 0,159 ó 15,9 probabilidades en 100. De la tabla 1 se deduce que no hay que sobrepasar el intervalo de límites prácticos para eliminar los ensayos de baja resistencia, si la producción es uniforme y si las especificaciones requieren: a) un valor suficientemente alto para \bar{x} ; b) un valor suficientemente bajo para f'_c .

T A B L A 1
Probabilidad de resultados bajos*

$\bar{x} - f'_c$ σ	Probabilidad de ensayos que caen por debajo de f'_c	$\bar{x} - f'_c$ σ	Probabilidad de ensayos que caen por debajo de f'_c	$\bar{x} - f'_c$ σ	Probabilidad de ensayos que caen por debajo de f'_c
0,05	0,480	1,05	0,147	2,05	0,0200
0,10	0,462	1,10	0,136	2,10	0,0180
0,15	0,440	1,15	0,125	2,15	0,0160
0,20	0,421	1,20	0,115	2,20	0,0140
0,25	0,401	1,25	0,106	2,25	0,0120
0,30	0,382	1,30	0,097	2,30	0,0110
0,35	0,363	1,35	0,089	2,35	0,0090
0,40	0,345	1,40	0,081	2,40	0,0080
0,45	0,326	1,45	0,074	2,45	0,0070
0,50	0,309	1,50	0,067	2,50	0,0060
0,55	0,291	1,55	0,061	2,55	0,0050
0,60	0,274	1,60	0,055	2,60	0,0045
0,65	0,258	1,65	0,050	2,65	0,0040
0,70	0,242	1,70	0,045	2,70	0,0035
0,75	0,227	1,75	0,040	2,75	0,0030
0,80	0,212	1,80	0,036	2,80	0,0025
0,85	0,198	1,85	0,032	2,85	0,0020
0,90	0,184	1,90	0,029	2,90	0,0019
0,95	0,171	1,95	0,026	2,95	0,0016
1,00	0,159	2,00	0,023	3,00	0,0013

* Según Cordon, ASTM STP-169-A.

Las tablas 2, 3 y 4 se construyeron a partir de la tabla 1 y muestran las resistencias requeridas para distintos valores de f'_c y para varias probabilidades de resultados con baja resistencia. El autor de la norma puede y debe disminuir la probabilidad de resultados ba-

jos a su propio nivel aceptable. La probabilidad de un resultado bajo en 10 se está considerando como el máximo permisible para hormigón estructural en el Nuevo Código de Construcción del ACI.

T A B L A 2
Límites de control para $f'_c = 140$ y 175 kp/cm^2 y $V = 10 \%$

$f'_c = 140 \text{ kp/cm}^2$			
Número permisible de ensayos por debajo de f'_c	Resistencia requerida en el proyecto de mezcla (kp/cm^2)	Límites de control	Resistencia mínima (límite 3σ) (kp/cm^2)
		Mínimo para media de tres (kp/cm^2)	
2 en 10	153	133	107
1 en 10	161	140	112
1 en 20	167	146	117
1 en 50	176	153	123
1 en 100	182	159	128
1 en 200	188	164	132
1 en 500	195	170	137
1,3 en 1.000	200	174	140
$f'_c = 175 \text{ kp/cm}^2$			
2 en 10	191	166	134
1 en 10	200	175	141
1 en 20	209	183	146
1 en 50	220	192	154
1 en 100	228	198	160
1 en 200	236	205	165
1 en 500	244	213	171
1,3 en 1.000	250	218	175

T A B L A 3
Límites de control para $f'_c = 210$ y 245 kp/cm^2 y $V = 10 \%$

$f'_c = 210 \text{ kp/cm}^2$			
Número permisible de ensayos por debajo de f'_c	Resistencia requerida en el proyecto de mezcla (kp/cm^2)	Límites de control	Resistencia mínima (límite 3σ) (kp/cm^2)
		Mínimo para media de tres (kp/cm^2)	
2 en 10	229	198	160
1 en 10	241	210	169
1 en 20	251	219	176
1 en 50	264	230	185
1 en 100	274	238	191
1 en 200	283	247	198
1 en 500	492	256	205
1,3 en 1.000	300	261	210
$f'_c = 245 \text{ kp/cm}^2$			
2 en 10	268	233	188
1 en 10	281	245	197
1 en 20	293	256	205
1 en 50	308	268	216
1 en 100	319	278	223
1 en 200	330	288	231
1 en 500	342	298	240
1 en 1.000	350	305	245

T A B L A 4
Límites de control para $f'_c = 280$ y 315 kp/cm^2 y $V = 10 \%$

$f'_c = 280 \text{ kp/cm}^2$			
Número permisible de ensayos por debajo de f'_c	Resistencia requerida en el proyecto de mezcla (kp/cm^2)	Límites de control	Resistencia mínima (límite 3σ) (kp/cm^2)
		Mínimo para media de tres (kp/cm^2)	
2 en 10	306	266	214
1 en 10	321	280	225
1 en 20	334	292	234
1 en 50	352	307	246
1 en 100	364	318	255
1 en 200	377	328	264
1 en 500	391	341	274
1,3 en 1.000	400	350	280
$f'_c = 315 \text{ kp/cm}^2$			
2 en 10	344	300	241
1 en 10	361	315	253
1 en 20	376	328	264
1 en 50	396	345	277
1 en 100	410	358	288
1 en 200	425	370	295
1 en 500	440	384	308
1,3 en 1.000	450	393	315

USO DE TABLAS PARA PREPARAR LAS ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA MINIMA PRACTICA

Una pregunta obvia que puede hacerse acerca de las prácticas corrientes es: ¿por qué se escriben las normas creando controversias acerca de la suficiencia de las estructuras de hormigón? Por ejemplo, una probabilidad de ensayos bajos de 2 en 10 es un 20 % de peligro de controversia. El juicio del propietario sobre la suficiencia de una estructura no debe arriesgarse especificando requerimientos de las mezclas de hormigón que, teóricamente, producirán una probabilidad indeseable de ensayos bajos.

LIMITES DE CONTROL

Lógicamente, las necesidades de una especificación práctica no pueden basarse sobre límites 3σ . La columna 3 de las tablas 2, 3 y 4 señala límites de control mínimo, basados en el criterio común de que la media de cada 3 ensayos consecutivos no debe de caer por debajo de estos límites. La probabilidad de que la media de cada 3 ensayos consecutivos caiga por debajo de los límites de control ocurre cuando la probabilidad de cualquiera de los ensayos que caen por debajo de f'_c es como se muestra en la columna 1.

EJEMPLOS DEL USO DE LAS TABLAS

Las exigencias de especificación posible son ilimitadas. Los siguientes ejemplos ilustrarán unos cuantos usos de estas tablas:

Ejemplo 1

Se han elegido las siguientes condiciones por el proyectista o autor de la especificación:

$$f'_c = 210 \text{ kp/cm}^2.$$

Probabilidad de que cualquier ensayo caiga por debajo de $f'_c = 1 \%$.

Coefficiente de variación requerido $V = 10 \%$.

Especificación al párrafo 1.—El contratista mostrará evidencia de que la mezcla de hormigón que propone emplear en la estructura producirá una resistencia media de 274 kp/cm^2 (tabla 3).

Especificación al párrafo 2.—La media de cada 3 ensayos consecutivos no caerá por debajo de 238 kp/cm^2 (tabla 3).

Nota: La probabilidad de que la media de cada tres ensayos consecutivos caiga por debajo de 238 kp/cm^2 , ocurre cuando la probabilidad de que cualquier ensayo caiga por debajo de 210 kp/cm^2 es de 1 en 100 (tabla 3). Para evitar factores componentes de seguridad, consideraremos la resistencia mínima (límite 3σ) que puede esperarse en este ejemplo:

Límite $3\sigma = 3 (0,10 \times 274) = 82 \text{ kp/cm}^2 = 274 - 82 = 192 \text{ kp/cm}^2$ (ver también tabla 3).

Resistencia mínima (límite 3σ) = $192 \text{ kp/cm}^2 = 0,915 f'_c$.

Con el valor empleado en este ejemplo, el proyectista puede eliminar la probabilidad de ensayos bajos, para fines prácticos, empleando un valor de resistencia mínima de 192 kp/cm^2 .

Especificación al párrafo 3.—Si la media de cada tres ensayos consecutivos cae por debajo de 238 kp/cm^2 , la resistencia del hormigón se aumentará a expensas del contratista.

Nota: La resistencia media requerida, dependerá de la uniformidad de control. Como se indicó en la tabla 3, para un coeficiente de variación de 10% , la resistencia media requerida en este ejemplo sería de 274 kp/cm^2 . Para un coeficiente de variación del 15% , sin embargo, la resistencia requerida sería de 323 kp/cm^2 . Para cumplir los requerimientos de la tercera especificación, el contratista debe elegir entre mantener el control uniforme o aumentar la resistencia media.

Ejemplo 2

Se supone que la resistencia de los elementos estructurales es muy crítica y el proyectista desea eliminar, en lo que sea posible, todos los ensayos resistentes por debajo de 210 kp/cm^2 .

En las tablas 3 y 4 encontramos que, para una resistencia mínima (límite 3σ) de 210 kp/cm^2 , la mezcla de hormigón debe de proyectarse para una resistencia de 300 kp/cm^2 .

Especificación 1.—El contratista mostrará evidencia de que la mezcla de hormigón que propone emplear en la estructura producirá una resistencia media de 302 kp/cm^2 .

Especificación 2.—La media de cada tres ensayos consecutivos no bajará de 268 kp/cm^2 .

Especificación 3.—Si la media de cada tres ensayos consecutivos cae por debajo de 268 kp/cm^2 , el contratista aumentará la resistencia media del hormigón a sus expensas.

Ejemplo 3

Supongamos $f'_c = 210 \text{ kp/cm}^2$; pero el proyectista estaría satisfecho con una resistencia mínima de $0,85 f'_c$, que aparece en muchas fórmulas de proyecto como resistencia final:

Resistencia mínima = $0,85 f'_c = 175 \text{ kp/cm}^2$.

Especificación 1.—El contratista mostrará evidencia de que la mezcla de hormigón que propone emplear en el proyecto producirá una resistencia media de 252 kp/cm^2 (tabla 3).

Especificación 2.—La media de cada tres ensayos consecutivos no caerá por debajo de 224 kp/cm^2 (tabla 3).

Especificación 3.—Si la media de cada tres ensayos consecutivos cae por debajo de 224 kp/cm², el contratista aumentará la resistencia media del hormigón a sus propias expensas.

Ejemplo 4

Se supone que los áridos y los cementos disponibles no producirán económicamente una resistencia media superior a 245 kp/cm².

El contratista se enfrenta con varias soluciones a elegir. Por ejemplo:

- a) Puede elegir para f'_c un valor de 210 kp/cm² y una probabilidad de ensayos bajos de 1 en 10 (tabla 3). El límite de control para la media de tres ensayos en este caso será de 210 kp/cm² y la resistencia mínima sería de 168 kp/cm²;
- b) Puede elegir para f'_c un valor de 175 kp/cm² y reducir la probabilidad de ensayos bajos a 1 en 300 (tabla 2). El límite de control y la resistencia mínima permanecerían como en la solución a).

VENTAJAS

Las especificaciones basadas en las tablas 2, 3 y 4 tienen diversas ventajas:

- 1) El ensayo de resistencia solamente se emplea para controlar las proporciones de la mezcla de hormigón. El problema de ensayos a largo plazo (28 días) se reduce al mínimo, puesto que las consecuencias de no cumplir las especificaciones son también mínimas.
- 2) La única controversia posible en condiciones de obra normales será el ajuste del costo del hormigón basado en la uniformidad de producción.
- 3) En condiciones de trabajo normales la suficiencia de la calidad de hormigón en una estructura no será discutible, porque la resistencia del hormigón se controla a nivel suficientemente alto, tal como establece el propietario, como para eliminar, a todos los fines prácticos, los indeseables ensayos de baja resistencia.
- 4) Si ocurren variaciones fuera de lo normal, como cuando el trabajo está fuera de control, los ensayos de resistencia a edades tempranas proporcionan una base para la inmediata acción.

DESVENTAJAS

Una de las pocas desventajas de este tipo de especificación es un costo extra aparente para crear una baja probabilidad de ensayos de baja resistencia. Sin embargo, se ha señalado, previamente, que el costo de cemento extra es muy pequeño comparado con el costo de las controversias acerca de la idoneidad del hormigón en una estructura. Es más, el cemento extra sobre el requerido para producir la resistencia media requerida se añade con frecuencia, actualmente. Es buena práctica ingenieril hacer el máximo uso de tales costos adicionales.

UNIFORMIDAD

La uniformidad del producto juega un papel importante en la reducción de bajas resistencias. Una probabilidad de sólo 1,3 en 1.000 de que un ensayo caiga por debajo de 210 kp/cm² (límite 3σ) puede lograrse produciendo una resistencia media de 300 kp/cm² con un coeficiente de variación del 10 %, mientras que un aumento del coeficiente de variación al 15 % requiere una resistencia de 382 kp/cm² (un extra de 64 kilos de cemento) para conducir a los mismos resultados.

Se ha demostrado que, con métodos y equipos modernos, la producción de hormigón ha progresado hasta el punto de que algunos fabricantes pueden mantener una uniformidad de resistencias que producirá un coeficiente de variación no mayor del 10 %. Esta meta debe estimular a todos los fabricantes, y el mejor estímulo es el aumento automático en la resistencia media requerida, a expensas del contratista, cuando el comportamiento no llega a este nivel.

HORMIGON DE ALTA RESISTENCIA

A medida que aumenta la resistencia f'_c del hormigón empleado en el proyecto de estructuras, lógicamente el problema de eliminar los ensayos de baja resistencia se hace mayor. La tabla 4 ilustra el intervalo de resistencia necesario para distintas probabilidades, con un f'_c de 280 y 315 kp/cm².

A medida que la resistencia del hormigón se hace más alta, una cantidad dada de cemento producirá un incremento en la ganancia de resistencia más pequeño. Nuevas adiciones de cemento alcanzan rápidamente el punto de “volver a disminuir” (“diminishing returns”) (4).

El valor de f'_c empleado en el proyecto debe contrapesarse con la probabilidad deseable de ensayos de baja resistencia y el costo de producir hormigón de alta resistencia. Desgraciadamente ocurre frecuentemente que cuanto más altas resistencias se emplean, menos resistencias bajas pueden tolerarse y deben eliminarse por un cuidadoso control de la producción y de la construcción. La industria del hormigón pretensado es un buen ejemplo de lo que puede lograrse.

CONCLUSIONES

- 1) El ensayo de resistencia es una herramienta valiosa para controlar las proporciones en una mezcla de hormigón. Un adecuado entendimiento y uso del ensayo de resistencia reducirá las controversias acerca de la suficiencia de las estructuras de hormigón.
- 2) Con ciertos requisitos, la resistencia media de los cilindros de ensayo proporcionará una indicación de la calidad media del hormigón en la estructura.
- 3) La suficiencia de una estructura de hormigón no puede estimarse a partir de los resultados de ensayos de resistencia individuales.
- 4) Los límites de control para la resistencia serán lo suficientemente altos como para que las variaciones normales no produzcan controversia acerca de la idoneidad del hormigón de las estructuras. La resistencia mínima (3σ) es práctica con una producción uniforme.
- 5) Proyectistas y dictadores de normas deben llegar a un acuerdo en lo siguiente:
 - a) probabilidad de ensayos de baja resistencia;
 - b) valor de f'_c usado en el proyecto;
 - c) consideraciones económicas.

Resumen

Las controversias respecto a la suficiencia de las estructuras de hormigón, basadas en la resistencia de un cilindro de hormigón, tienden a debilitar la industria del hormigón.

El propietario debe tener una seguridad plena de que su edificio es estructuralmente sano. Debido a las variaciones normales, el contratista y el fabricante de hormigón, bajo especificaciones comunes, no pueden producir hormigones sin que se produzcan resultados de ensayo de baja resistencia.

Este artículo discute este problema y muestra que la probabilidad de una "resistencia mínima" puede ser práctica cuando las especificaciones son realistas y cuando la producción de hormigón es uniforme.

REFERENCIAS

- (1) PRICE, WALTER H.: *Factors Influencing Concrete Strength*, ACI Journal, Proceedings V. 47, no. 6, Feb. 1951, págs. 417-432.
- (2) BLOEM, DELMAR L.: *Concrete Strength—Whose? and How?* 38th Annual Convection, NRMCA, Jan. 15, 1968.
- (3) ACI Committee 214, *Recommended Practice for Evaluation of Compression Test Results of Field Concrete* (ACI 214-57), ACI Journal, Proceedings V. 54, No. 1, July 1957, págs. 1-19.
- (4) CORDON, WILLIAM A., and GILLESPIE, H. ALDRIDGE, *Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete*, ACI Journal, Proceedings V. 60, No. 8, Aug. 1963, págs. 1.029-1.052.